

CLIPPEDIMAGE= JP02000283159A

PAT-NO: JP02000283159A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 2000283159 A

TITLE: CONTROL TYPE MAGNETIC BEARING DEVICE

PUBN-DATE: October 13, 2000

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

SHINOZAKI, HIROYUKI

COUNTRY

N/A

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

EBARA CORP

COUNTRY

N/A

APPL-NO: JP11144701

APPL-DATE: May 25, 1999

INT-CL (IPC): F16C032/04

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a control type magnetic bearing device capable of stably floating and supporting a rotor by generating a control signal in accordance with only a displacement sensor signal of a control shaft fundamentally and restraining whirling of the rotor by external force synchronized with rotational motion.

SOLUTION: A second control unit 7 is furnished in parallel with a first control unit 5, a sensor signal is introduced to the second control unit 7, a signal changing its phase is formed from a displacement sensor signal, an output signal of the second control unit is added to an output signal of the first control unit and an electric current of an electromagnet is controlled in

accordance with the added output signal in a magnetic bearing device which is a control type magnetic bearing device to support a rotor and which is furnished with sensor units 2a, 2b, 4 to detect kinetic information of the rotor 1, the first control unit 5 to compute a control signal in accordance with their sensor signals, power amplifier units 6a, 6b to drive the electric current in accordance with a control unit signal and the electromagnets 3a, 3b and supports the rotor in the radial direction.

COPYRIGHT: (C)2000,JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2000-283159
(P2000-283159A)

(43) 公開日 平成12年10月13日 (2000. 10. 13)

(51) Int.Cl.⁷
F 1 6 C 32/04

識別記号

F I
F 1 6 C 32/04

データベース* (参考)
A 3 J 1 0 2

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願平11-144701

(22) 出願日 平成11年5月25日 (1999. 5. 25)

(31) 優先権主張番号 特願平11-18720

(32) 優先日 平成11年1月27日 (1999. 1. 27)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000000239

株式会社荏原製作所

東京都大田区羽田旭町11番1号

(72) 発明者 篠崎 弘行

東京都大田区羽田旭町11番1号 株式会社
荏原製作所内

(74) 代理人 100091498

弁理士 渡邊 勇 (外2名)

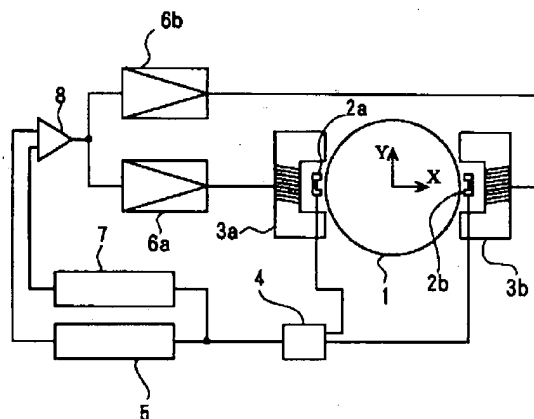
Fターム(参考) 3J102 AA01 BA03 CA22 DA03 DA09
DB05 DB26 GA01 GA20

(54) 【発明の名称】 制御形磁気軸受装置

(57) 【要約】

【課題】 基本的に制御軸の変位センサ信号のみに基づき、制御信号を発生させ、回転運動に同期した外力による回転体の振れ回りを抑制して、回転体を安定に浮上支持できる制御形磁気軸受装置を提供する。

【解決手段】 回転体を支持する制御形磁気軸受装置であって、回転体1の運動情報を検出するセンサユニット2a、2b、4と、そのセンサ信号に基づき制御信号を演算する第一の制御ユニット5と、該制御ユニット信号に基づき電流を駆動するパワーアンプユニット6a、6bと、磁気力を発生する電磁石3a、3bとを備えた、回転体をラジアル方向に支持する磁気軸受装置において、第一の制御ユニット5と並列に第二の制御ユニット7を備え、センサ信号を該第二の制御ユニットへ導入し、該第二の制御ユニット内では、変位センサ信号からその位相を変化させた信号を生成し、該第二の制御ユニットの出力信号を第一の制御ユニットの出力信号に加え、該加算した出力信号に基づき、電磁石の電流を制御するようにした。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 回転体を支持する制御形磁気軸受装置であって、回転体の運動情報を検出するセンサユニットと、そのセンサ信号に基づき制御信号を演算する第一の制御ユニットと、該制御ユニット信号に基づき電流を駆動するパワーアンプユニットと、磁気力を発生する電磁石とを備えた、回転体をラジアル方向に支持する磁気軸受装置において、

前記第一の制御ユニットと並列に第二の制御ユニットを備え、前記センサ信号を該第二の制御ユニットへ導入し、該第二の制御ユニット内では、前記センサ信号からその位相を変化させた信号を生成し、該第二の制御ユニットの出力信号を前記第一の制御ユニットの出力信号に加え、該加算した出力信号に基づき、前記電磁石の電流を制御するようにしたことを特徴とする制御形磁気軸受装置。

【請求項2】 前記第二の制御ユニットにおける位相の変化量は、前記磁気軸受の外力／変位の伝達特性から、前記回転体の振れ回りを抑制するのに好適な位相の変化量を与えるものであることを特徴とする請求項1に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項3】 前記第二の制御ユニットには、前記センサ信号から回転周波数成分を抽出するフィルタと、該フィルタ出力信号の位相を調整する位相調整器と、該位相調整器出力と基準電位とを比較するコンパレータを含む信号形成器と、該信号形成器出力信号の振幅を調整するゲイン調整器とを備えたことを特徴とする請求項1又は2に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項4】 前記ゲイン調整器は、回転数に比例したゲインを与える回転数比例ゲイン調整器を含むものであることを特徴とする請求項3に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項5】 前記第二の制御ユニットには、可変周波数フィルタと、モータ回転数に対応した回転体の振れ回りの抑制に好適な位相の変化量を与える手段とを備えたことを特徴とする請求項1又は2に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項6】 前記モータ回転数に対応した位相の変化量は、前記磁気軸受の外力／変位の伝達特性から、回転数に対応させて記憶した記憶器と、該記憶器から読み出して位相を調整するようにした位相調整器とを備えたものであることを特徴とする請求項5に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項7】 前記モータ回転数に対応した位相の変化量は、前記磁気軸受の外力／変位の伝達特性を近似させた演算回路を用いたものであることを特徴とする請求項5に記載の制御形磁気軸受装置。

【請求項8】 請求項1乃至7のいずれかの制御形磁気軸受装置において、前記第二の制御ユニット内の信号の流れをオン・オフす

る信号スイッチを備え、更に前記センサ信号と基準信号とを比較し、該比較した結果により前記信号スイッチをオン・オフする第三の制御ユニットを備えたことを特徴とする制御形磁気軸受装置。

【請求項9】 請求項1乃至7のいずれかの制御形磁気軸受装置において、

前記第二の制御ユニット内の信号の流れをオン・オフする信号スイッチを備え、実回転数信号と基準信号を比較する比較器と、前記信号スイッチをオン・オフする指令信号を発生する信号発生器とを含む第四の制御ユニットを備えたことを特徴とする制御形磁気軸受装置。

【請求項10】 請求項1乃至9のいずれかの制御形磁気軸受装置において、

第二の制御ユニット内のコンパレータを含む信号形成器の後段に、更に第二の回転周波数成分抽出器を備えたことを特徴とする制御形磁気軸受装置。

【請求項11】 請求項1乃至9のいずれかの制御形磁気軸受装置において、

第二の制御ユニット内の信号スイッチを入れる前のセンサ出力と該信号スイッチを入れた時の前記センサ出力とを比較し、ゲイン調整器のゲイン設定値を変更する指令値を出力する第五の制御ユニットを備えたことを特徴とする制御形磁気軸受装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、回転体の支持手段として磁気軸受を使用した装置の該磁気軸受の制御装置に係り、特にアンバランスな回転体の振れ回り運動に対する振動振幅を小さく抑えるのに好適な制御形磁気軸受装置に関する。

【0002】

【従来の技術】図1は、制御形磁気軸受装置の基本的な構成を示す。理解し易くするために、回転体のラジアル方向を支持する軸受の一部分を抜き出して説明する。回転軸に直交するX-Y軸平面のX軸分について、図1にそのフィードバック制御系の構成を示す。回転体1を中心に横軸にX軸、縦軸にY軸をとり、X軸上に回転体を挟むように変位センサ2a、2bと、電磁石3a、3bを配置している。Y軸には、図示が省略されているが、同様に電磁石及び変位センサが配置されている。変位センサ2a、2bはセンサアンプ4とつながっており、これらで構成される変位センサユニットを備えている。センサアンプ4の出力信号は、回転体の変位に相当した電気信号（センサ信号）である。このセンサ信号は、回転体を所望の浮上位置に保持するための補償信号を形成する第一の制御ユニット5へ入力される。

【0003】第一の制御ユニット5で演算した結果は、パワーアンプ6a、6bを介して制御電流を電磁石3a、3bのコイルに供給する。パワーアンプは、電磁石3a、3bのそれぞれに対応した個別のパワーアンプ6

a, 6bを備えている。電磁石3a, 3bでは供給された電流により電磁力が発生し、回転体1に対して磁気吸引力を作用させる。このように回転体1の左右への変位に応じて、対向する一対の電磁石に制御電流を供給し、その吸引力によって回転体1が中心位置又は目標位置に浮上保持するようにサーボ制御する。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】ところで、磁気軸受の適用が広汎に進むにつれて、構造、大きさの制約から下記問題に直面することがある。例えば回転体の有する不釣り合い量が大きく、これを磁気軸受でラジアル方向に支持して回転させると、回転体が偏心して回転する、いわゆる振れ回りを起こす場合がある。この場合には、回転体の偏心量が大きくなると、磁気軸受のタッチダウン隙間に収まらず、その結果、非接触浮上が行えず、装置を損傷する恐れが発生する。回転体の浮上位置がモータステータに対して、その磁気的中心に位置しない場合に、回転運動に同期した外力を回転体がモータステータから受ける。特に、例えば送風機などの回転により仕事をする機械の場合、回転数の上昇に伴う負荷の増加によりモータ出力を大きくする必要があり、回転運動に同期した外力が大きく作用する。

【0005】又、モータが回転運動に同期したラジアル方向の電磁力を発生する場合に、回転体の浮上位置にかかわらず、外力としての作用が大きな負担になる。その結果、回転体は大きく振れ回り、程度によってはタッチダウンしてしまう。いずれも、外力に対して十分な制御力を発生できる軸受を適用すれば問題は解決するが、磁気軸受の剛性が転がり軸受や滑り軸受に比べて小さいことから、従来の軸受剛性と同等の剛性を発生できる電磁石を採用することは難しい。例えば、1平方センチメートルの面積が対向する空間に、磁束密度1テスラを発生させた場合の吸引力は、Maxwellの応力の式が示す通り約40ニュートンである。制御形磁気軸受の場合には、一般に0.5テスラ程度であるから約10ニュートンしか得られない。

【0006】このような背景で、最近では回転運動に同期した外力を推定し、外力を相殺する制御信号をパワーアンプ入力に加算して、振れ回りを抑制するフィード・フォワード制御が試みられたものがある。また、既知の外力に対して、回転数に同期した正弦波や三角波信号をパワーアンプ入力に加算して、振れ回りを制御するオープンバランス制御が知られている。いずれも、制御軸の変位センサ信号の他に、直交する軸の変位センサ信号や回転運動に同期したパルス信号などを必要とする。

【0007】本発明は上述した事情に鑑みて為されたもので、基本的に制御軸の変位センサ信号のみに基づき、制御信号を発生させ、回転運動に同期した外力による回転体の振れ回りを抑制して、回転体を安定に浮上支持できる制御形磁気軸受装置を提供することを目的とする。

尚、「基本的に」とは制御信号を生成させることには使用しないが、下記2点の目的に既存のモータコントローラから得られる回転数に比例した電圧信号を使用する。

(1) 制御信号をパワーアンプ入力へ加算する手前のスイッチのオン・オフ。

(2) 回転数成分抽出フィルタの動作。

【0008】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の発明は、回転体を支持する制御形磁気軸受装置であって、回転体の運動情報を検出するセンサユニットと、そのセンサ信号に基づき制御信号を演算する第一の制御ユニットと、該制御ユニット信号に基づき電流を駆動するパワーアンプユニットと、磁気力を発生する電磁石とを備えた、回転体をラジアル方向に支持する磁気軸受装置において、前記第一の制御ユニットと並列に第二の制御ユニットを備え、前記センサ信号を該第二の制御ユニットへ導入し、該第二の制御ユニット内では、前記変位センサ信号からその位相を変化させた信号を生成し、該第二の制御ユニットの出力信号を前記第一の制御ユニットの出力信号に加え、該加算した出力信号に基づき、前記電磁石の電流を制御するようにしたことを特徴とする。

【0009】又、前記第二の制御ユニットにおける位相の変化量は、前記磁気軸受の外力/変位の伝達特性から、前記回転体の振れ回りを抑制するのに好適な位相の変化量を与えるものであることが好ましい。

【0010】これにより、回転体に振れ回りがあると、変位センサにこの振れ回りに対応した信号が現れる。従って、この信号に対応させて、磁気軸受の制御特性から振れ回りに作用する外力に対して反対方向の制御力を作用させることで、振れ回りを小さくすることができる。この制御力は磁気軸受の制御特性から、変位センサ信号に対して、適当量の位相の調整によって与えられる。特に、磁気軸受の外力/変位の伝達特性から、回転体の振れ回りの抑制に好適な位相の変化量が得られる。即ち、従来のサーボ制御構成でのパワーアンプ入力信号に対する変位センサ出力信号の伝達特性(利得、位相)データを参考にし、第二の制御ユニット内の位相調整器の設定値を決定し、得られた第二の制御ユニット出力信号を第一の制御ユニット出力信号に加えて、パワーアンプユニットに入力して、電磁石の電流を制御することによって達成される。

【0011】又、請求項3に記載の発明は、前記第二の制御ユニットには、前記センサ信号から回転周波数成分を抽出するフィルタと、該フィルタ出力信号の位相を調整する位相調整器と、該位相調整器出力と基準電位とを比較するコンパレータを含む信号形成器と、該信号形成器出力信号の振幅を調整するゲイン調整器とを備えたことを特徴とする。これにより変位センサユニットからのセンサ信号のうち振幅に関する情報を切り離して、位相に関する情報のみを取り出して所望の位相量を変化させ

ると共に任意のゲインを与えることができ、これにより回転体の振れ回りの抑制に好適な電磁石の制御力を供給することができる。ここで、前記ゲイン調整器は、回転数に比例したゲインを与える回転数比例ゲイン調整器を含むものであることが好ましい。

【0012】又、請求項5に記載の発明は、前記第二の制御ユニットには、可変周波数フィルタと、モータ回転数に対応した回転体の振れ回りの抑制に好適な位相の変化量を与える手段とを備えたことを特徴とする。これにより、可変周波数フィルタによるモータ回転数に対応したセンサ信号を取り出し、その取り出した信号に対して回転体の振れ回りの抑制に好適な位相の変化量を与えることで、任意の回転速度に対して適当な位相量の調整を行うことができる。従って、広い回転速度範囲で回転体の振れ回りを小さくすることができる。

【0013】又、前記モータ回転数に対応した位相の変化量は、前記磁気軸受の外力／変位の伝達特性から、回転数に対応させて位相の変化量を記憶した記憶器と、該記憶器から読み出して位相を調整するようにしたものであることが好ましい。これにより任意の回転速度に対応した振れ回りの抑制に好適な位相の変化量を与えることができる。

【0014】又、前記モータ回転数に対応した位相の変化量は、前記磁気軸受の外力／変位の伝達特性を近似させた演算回路を用いて与えるようにしてもよい。これにより、上述のような高価な記憶器等を用いずに、簡単なアナログ回路により振れ回りの抑制に好適な位相の変化量を与えることができる。

【0015】又、請求項8に記載の発明は、前記第二の制御ユニット内の信号の流れをオン・オフする信号スイッチを備え、更に前記センサ信号と基準信号とを比較し、該比較した結果により前記信号スイッチをオン・オフする第三の制御ユニットを備えたことを特徴とする。回転体の振れ回りが大きい状態で第二の制御ユニットよりの信号をオン状態にすることで回転体の振れ回り運動を抑制することができる。そして、回転体の振れ回りが小さな場合には、第二の制御ユニットからの信号をオフすることにより、通常の第一の制御ユニットからの補償信号の生成のみで十分な回転体の浮上保持ができる。

【0016】又、第二の制御ユニット内のコンパレータを含む信号形成器の後段に、更に第二の回転周波数成分を抽出するフィルタを備えることが好ましい。これにより第二の制御ユニットからの出力信号を矩形波からその高調波成分を除去した低次の正弦波とすることができ、高調波による雑音発生等の障害を防止することができる。

【0017】又、第二の制御ユニット内の信号スイッチを入れる前のセンサ出力と該信号スイッチを入れた時の前記センサ出力とを比較し、ゲイン調整器のゲイン設定値を変更する指令値を出力する第五の制御ユニットを備

えることが好ましい。これにより、第二の制御ユニットよりの信号をオン状態とするに際して、そのゲイン調整器のゲインを適切な値に設定することが可能となり、振れ回りの抑制に好適なゲインを与えることが可能となる。

【0018】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について図2乃至図9を参照しながら説明する。尚、各図中同一符号は同一又は相当部分を示す。

10 【0019】図2は、図1に示す基本構成に加えて、第二の制御ユニット7を備えた磁気軸受装置の制御系の構成例を示す。この制御形磁気軸受装置は、従来の図1に示す磁気軸受装置の基本構成に対して、第二の制御ユニット7を第一の制御ユニット5に対して並列に備え、その出力を信号合成器（加算器）8にて第一の制御ユニットの出力と加算して合成するようにしている。その他の構成は、図1に示す基本的な制御形磁気軸受装置の構成と同様である。図3は、図2に示す制御系をモデル化してブロック図で示したものである。ここで磁気軸受は、回転体の質量 M と、磁気軸受合剛性 K_u から、図示するような関数でもっとも単純な系として表現される。尚、 S はラプラス演算子を示している。

【0020】図4は、第二の制御ユニット7内の構成例を示す。第二の制御ユニット7は、バッファアンプ7aと、回転周波数成分抽出器7bと、位相（移相）調整器7cと、コンパレータを含む信号形成器7dと、ゲイン調整器7eとから構成されている。ここでは、変位センサ信号からバッファアンプ7aで増幅後に回転周波数成分を抽出するフィルタである回転周波数成分抽出器7bを備える。そして、抽出された信号の位相を位相調整器7cで調整し、その調整器出力と基準電位とを比較するコンパレータにより0Vに対して正負方向に振れる信号を形成し、ゲイン調整器7eで出力信号の振幅を調整した信号を合成器（加算器）8に対して出力する。即ち、変位センサ出力信号を回転周波数信号抽出器を通してモータ回転数に対応した信号成分を抽出し、更に位相調整器で任意の位相（移相）調整量を与え、得られた信号をコンパレータを含む信号形成器7dで受ける。コンパレータで受けることにより、信号のモータ回転数に対応した周波数と位相情報は下流に伝達されるが、振幅情報は遮断される。尚、この信号処理が必要なため、コンパレータを使用した信号形成器としている。

【0021】図5は、第二の制御ユニット7のバッファアンプ7a、周波数成分抽出器7b、位相調整器7cの具体的な回路構成例を示す。図示するように、汎用の演算増幅器とCR素子などで簡素に構成されている。バッファアンプ7aは、演算増幅器を用いたアンプであり、回転周波数成分抽出器7bは、演算増幅器とCR素子とを組み合わせたフィルタ回路である。位相調整器7cも、同様に演算増幅器とCR素子とを組み合わせた回路

であり、接地側に接続されたボリュームの調整により位相量の調整が可能である。これらの回路では、変位センサからの回転信号に同期した周波数成分の正弦波が取り出され、所望量の位相が位相調整器のボリュームの調整により行われる。即ち、可変抵抗器のボリューム調整で0〜180[deg]の位相調整が可能である。

【0022】図6は、コンパレータを含む信号形成器7dとゲイン調整器7eとの回路構成例と、各部の信号波形を示す。信号形成器7dは、図示するような比較器71a、71bと符号反転を行う演算増幅器72a、72bとを組合わせた回路であり、後述するように0V（接地電位）に対して+側及び-側に振れた出力信号を形成する。そしてゲイン調整器7eは、同様に演算増幅器72cからなるアンプである。位相調整器7cの出力は、①に示すように正弦波であり、この信号はコンパレータ71aにより基準電位と比較され、②に示すように矩形波状の波形を出力する。そして、位相調整器7cの出力は分岐され、反転器72a、コンパレータ71bに入力され、その波形が③に示すように②と反転した矩形波状の波形が得られる。そしてこの波形を更に反転器72bで反転させ、この波形が④で示すようになる。そして、これをゲイン調整器7eのアンプ72cで振幅を調整すると共に合成することにより、⑤に示すような接地電位を中心として上下に振れる矩形波が形成される。尚、このゲイン調整器7eは、図1に示す従来の制御装置では、電磁石を駆動する電力増幅回路内に配置されていたものを兼用している。上述した第二の制御ユニット7の回路構成例から明らかなように、変位センサユニットからのセンサ信号の周波数と位相に関する情報のみを取り出され、その位相を調整して第一の制御ユニット5の信号に合成器8で加算するようにしたものである。従って、センサ信号の振幅に関する情報は下流側には伝達されない。

【0023】そして、第二の制御ユニット7内の回転周波数信号抽出器7bは、例えば、図5に示したアナログ回路によるバンドパスフィルタでもよいし、市販機能モジュールの電圧同調型バンドパスフィルタでもよい。この電圧同調型バンドパスフィルタは、外部からの電圧信号0〜10（V）に対応する中心周波数に通過周波数を調整できる。例えば、株式会社エヌエフ回路設計ブロックのカatalog No. D98X-D16-23A2記載の型式VT-2BPA、ダイテル株式会社のデータシート No. 85/9/5K/13.2記載の型式FLJ-VB等がこれに相当する。

【0024】図7は、信号形成器7dの変形例を示す図である。図6に示す信号形成器がコンパレータ及び演算増幅器を数個使用していたのに対して、2個の演算増幅器で同等の機能を有する回路を構成できる。即ち、

(a)に示す回路構成で、符号77は、演算増幅器を使用したコンパレータであり、符号78は同様に演算増幅

器を使用した反転アンプ（インバータ）である。ここでコンパレータ77は、(b)又は(c)に示すような入力・出力特性を有する非線形要素を用いている。このような入出力特性を有するコンパレータを用いることにより、図6に示した信号形成器に対して極めて簡単な回路構成で(d)に示すように、正弦波入力信号①に対して、0ボルトを中心に正負側に振れる矩形波信号⑤を形成することができる。そして図6に示す回路と同様にセンサ信号の周波数成分及び位相成分のみを下流側に伝達し、振幅成分を下流側に伝達しない構成とすることができる。

【0025】図8は、第二の制御ユニット内にスイッチ7fを設け、更に第三の制御ユニット9を備え、変位信号と基準信号とを比較し、基準値以上の場合、即ち、振れ回りが所定値（基準値）よりも大きな場合には、スイッチ7fをオンするようにしたものである。

【0026】即ち、第二の制御ユニット7内の信号の流れをオン・オフする信号スイッチ7fを備え、更に変位センサの出力信号と基準信号とを比較し、信号スイッチ7fをオン・オフする第三の制御ユニット9を備える。これにより、変位センサ信号が所定の基準値以上である場合にのみ、第二の制御ユニットの出力信号が第一の制御ユニットの出力信号に加算される。図9は、第三の制御ユニット9内の構成例を示す。第三の制御ユニット9は、図示するように比較器73a、73b、反転アンプ74、反転器75a、75b、及び加算器76から構成される。

【0027】図10は、第四の制御ユニット10を備え、モータコントローラからの回転数に比例した電圧信号と基準信号とを比較して、基準信号以上の場合には、スイッチ7fをオンする構成を示している。この第四の制御ユニット10は、実回転数信号と基準信号を比較する比較器10aと、第二の制御ユニット内に設けられた信号の流れをオン・オフする信号スイッチ7fに対してオン・オフ指令信号を発生する信号発生器10bとを備えている。これにより、図8に示す実施の形態が変位センサの信号を基準として、第二の制御ユニット7内の信号スイッチ7fのオン・オフを行っていたのに対して、モータコントローラからの回転数信号を基準として、即ち、モータの回転数が所定値以上に大きくなった場合には、第二の制御ユニット7内の信号スイッチ7fのオン・オフを行うことができる。

【0028】図11は、第二の制御ユニット内の構成の変形例を示す。(a)は、第二の制御ユニット7内のコンパレータを含む信号形成器7dの後段に、回転周波数信号抽出器7bと同じ機能のフィルタである回転周波数成分抽出器7b'を備えている。これにより、矩形波状信号から回転周波数に同期した低次の正弦波状信号にすることができる。従って、矩形波信号を制御出力として、パワーアンプに入力した時よりも回転体の振れ回り

10

20

30

40

50

抑制効果は多少低下するが、高調波成分の電流を流さないようにできるため、回転体の高次モードを励振せずにすむ。(b)は、(a)に対して回転周波数成分抽出器7b'とゲイン調整器7eの位置を入れ替えたものである。同様に(c)は、図8に示すように信号の流れをオン・オフする信号スイッチ7fを第二の制御ユニット7内に設けたものである。更に、回転数に非同期の固有振動数をもつ外力が回転体に作用する場合は、第二の制御ユニット7内の回転周波数信号抽出器7b、7b'をその固有の振動数信号抽出器にすればよい。

【0029】図12は、第五の制御ユニット11を備え、変位センサ出力を観測し、第二の制御ユニット内の信号スイッチ7fをオン時、オフ時の変位センサ振幅を比較し、ゲイン調整器7eの大きさの設定をするようにしたものである。第二の制御ユニット内の信号スイッチ7fを入れる前の(制御オフ時の)変位センサ出力と、該信号スイッチを入れた時の(制御オン時の)変位センサ出力とを比較して、ゲイン調整器7eのゲイン設定値を変更する第五の制御ユニット11を備えている。これにより、モータ回転数が所定値以上に達すると、第四の

制御ユニット9によりスイッチ7fがオン状態となり、振れ回りの抑制が行われるが、ゲイン調整器7eに適切なゲインを設定することが可能となる。従って、振れ回りを一層抑制することができる。

【0030】図13は、第六の制御ユニットを備え、モータコントローラからの回転数に比例した電圧信号と変位センサ信号を入力し、回転数毎に予め位相調整器に設定しておき、モータ回転数に対応した位相調整量を位相調整器7cに設定するようにしたものである。この時、

回転周波数成分抽出器7bは、電圧値を変化することで可変周波数のフィルタ回路を用いる。これによりモータ回転数に対応した周波数成分の抽出が可能である。図14は、第六の制御ユニット内に従来のサーボ制御構成でのパワーアンプ入力信号に対する変位センサ出力信号の伝達特性(利得、位相)データを計測して記憶器に内蔵している。そして、モータ回転数に対応した位相調整量を記憶したデータから読み出し、位相調整器7cに設定するようにしたものである。これにより、任意のモータ回転速度に対してそれぞれに対応した位相の変化量を付与することができ、低速から高速に至る全領域に対して振れ回りの抑制が可能となる。

【0031】図15は、第六の制御ユニットの変形実施例を示すものである。図14に示す第六の制御ユニットが磁気軸受の伝達特性のデータを記憶器に内蔵しているのに対し、図15に示す第六の制御ユニットは磁気軸受の伝達特性をアナログ回路で模擬したものである。図15(a)に示すように演算増幅器とCR素子とからなる一次フィルタ回路を2段用いて、(b)のゲイン特性及び(c)の位相特性を形成している。ここでキャパシタ素子C'は広域ゲインを落とし、演算増幅器の動作を安

定化させるためのものである。又、この回路構成は通常のPID制御の微分要素(位相進み回路)としても一般に使用されているものである。この(b)及び(c)に示す特性は、後述の図17に示す磁気軸受の伝達特性を模擬したものである。そして、例えば50Hzに対して約90°~100°程度の位相の変化量を与えるものである。そして25Hzでは約65°程度の位相の変化量を与えることができる。そしてこの範囲において図示するようにゲインは殆ど平坦である。

10 【0032】以下に実機を用い、上記各制御装置を動作させた結果について説明する。図16は、磁気軸受で支持されたモータ本体の構造例を示す。以下に述べる検証実験は、図中のラジアル磁気軸受32を使用する。図16は、磁気浮上式スピンドライヤの試作機の一部である。この機械は、回転軸15がアキシアル磁気軸受33及びラジアル磁気軸受32によりそれぞれアキシアル方向及びラジアル方向に支持されており、モータ31により回転駆動される。下側に位置するウエハホルダ35に25枚の8インチウエハを搭載する。ウエハWは、外周を2本の固定バーと脱着可能な可動バー1本の計3本の梁で支持されている。そのため、ウエハの位置ずれによる不釣り合い量と梁の変形による不釣り合い量が作用するものである。

【0033】図17は、一つのラジアル磁気軸受のサーボ制御系の特性(パワーアンプ入力に対する変位センサ出力応答)の実測例を示す。これは、外乱として回転体に作用する外力(R)とこれに対応した回転体の変位(S)に対する比R/Sに対応している。即ち、分母に変位センサ出力信号(S)、分子に計測のためにパワーアンプ入力信号に加算した信号(R)とし、横軸を周波数軸、縦軸に利得(ゲイン)と位相(フェイズ)を記している。このゲイン特性に既知である変位センサ感度を定数: K_s (V/m)、パワーアンプゲイン: K_d (A/V)、電磁石ゲイン: K_c (N/A)をかけると(図3を参照)、磁気軸受剛性の周波数特性相当になるが実際には、それぞれの周波数応答があるため厳密ではない。実際にスピンドライヤとして運転される周波数範囲は、0~50Hz(0~3000rpm)であり、位相特性としては、50Hzで108deg、25Hzで65deg程度の値となっていることが判る。

【0034】ここで注目したいのは、位相特性、即ち、回転動作周波数における位相情報である。この位相情報が、第二の制御ユニット内の位相調整器に設定する調整量の元になる。ここで、「元になる」としたのは、

(1)パワーアンプの入力電圧(V)に対する出力電流(A)の非線型性があり、入力電圧が大きくなると、利得と位相で示した周波数応答は顕著に劣化する場合がある。つまり、回転体の振れ回り振幅が大きくなっている時は、図17に示した位相特性にパワーアンプの周波数応答劣化分を補正する必要もある。また、(2)第二の

制御ユニット出力がパワーアンプに入力されて、最終的に力として回転体に作用するまでの周波数特性を同じく考慮する必要もある。ただし、比較的低い周波数ではさほどの影響はなく、先の位相特性値相当の値を使用すればよい。実験の結果によれば、補正量は概略値でも得られる効果は同等であった。

【0035】図18乃至図21はオープンバランス制御相当の試験をした結果を示す。この試験の目的は、加え合わせる制御信号と変位センサ信号との与えるべき位相差が、図17に示した磁気軸受剛性の周波数特性相当データの位相データを元に、推定した値相当で効果が得られることの検証である。制御信号は、市販の信号発生器で発生させた。図18及び図19は、回転数3000rpm(50Hz)での(a)変位センサ出力信号と(b)制御信号(第二の制御ユニットの出力信号)である。図18は制御オフ時、図19は制御オン時の時間波形である。与えた位相量は概略108(deg)である。図示していないが、この位相量を多少上下に変動させてみたが、効果はさほどの変化は確認できなかった。

【0036】図20及び図21は、回転数1500rpm(25Hz)での変位センサ出力信号と制御信号である。図20は制御オフ、図21は制御オン時の時間波形である。与えた位相量は概略64.8(deg)である。これもまた、図示していないが、この位相量を多少上下に変動させてみたが、効果はさほどの変化は確認できなかった。

【0037】次に、図4乃至図6に示した第二の制御ユニットを使用して、振れ回りの抑制作用を検証した結果を図22及び図23に示す。回転数は3000rpmであり、(a)変位センサ出力信号と、(b)制御信号とをそれぞれ示している。図22は制御オフ時、図23は制御オン時の時間波形である。図18乃至図21で示した結果と同等の結果が得られている。この実験に用いた図4の回路の入力信号と出力信号の伝達特性を図26に示す。位相調整量は、3000rpm(50Hz)に対して約90~100deg進みとなっていることが判る。

【0038】更に、不釣り合い重りを増やし、従来のサーボ制御ではタッチダウンしてしまうケースについて、第二の制御ユニットによる作用を検証した結果を図24及び図25に示す。この場合、回転軸に直交するX軸とY軸平面の2つのサーボ制御系に、第二の制御ユニットをそれぞれ備え実験した。回転数は3000rpm、上段にX軸変位センサ出力信号、下段にY軸変位センサ出力信号の時間波形を記す。図24は制御オン状態、図25はタッチダウンしながら回転している状態に本制御をオンした時の時間波形である。いずれも、振れ回りを抑える作用が確認できる。この2例の実験で用いた位相量を図17の位相データと比較すると、概略20%増しぐらいであることがわかる。更に、図12に示すように、第二の制御ユニット内のゲイン調整器の設定を調整する

ことで、振れ回り振幅を抑制できる。作用の上限はパワーアンプの基本性能と電磁石の磁路の磁気飽和具合によって決まる。

【0039】図27乃至図29は、回転数変動の急峻な場合でも、本発明の回路構成によれば、図16に示すウエハスピンドライヤにおいて、回転体の振れ回りを十分に抑制できることを示している実験データである。図27は、第二の制御ユニットの構成例を示す。入力信号はバッファアンプ7aで増幅され、回転数同期信号抽出器7bで回転数に対応した信号の成分が抽出される。この抽出器として、例えばNF回路設計社製の型式VT-2BPAが用いられる。そして位相調整器7cで位相の調整量が与えられる。得られた信号をコンパレータ7dで基準電圧と比較することにより、振幅情報は遮断され、モータ回転数に対応した周波数と位相情報のみが下流側に伝達される。そしてゲイン調整器7e、7fでゲインを調整し、第一の制御ユニット5の信号出力に加算し、電磁石に制御電流を供給している。ここでゲイン調整器7eは、回転速度に無関係な固定のゲイン調整器であり、ゲイン調整器7fは回転数に比例したゲインを与える回転数比例ゲイン調整器であり、例えばアナログデバイス社製の型式AD633が用いられる。

【0040】図28は、回転数がゼロから所定速度迄急峻に立ち上がり、2400rpm程度の高速(所定速度)で、一定時間の運転を行い、次に急峻に減速して停止する場合のウエハスピンドライヤにおける回転体の振れ回りの状況を示している。図示するように、回転スタート時からバランス制御をオンすることにより、急峻な立ち上がり時期にも回転体の振れ回りはTD(Touch Down)レベルに対して十分な余裕があることが判る。そして、高速回転時にバランス制御をオフすると、変位センサ出力(a)(b)に示されるように回転体の振れ回りはTD(Touch Down)レベルまで増大することが判る。更に、急峻な立ち下がり時においても、回転体の大きな振れ回りを生じることなく回転体の回転が停止する。

【0041】図29は、図28と同様な急峻な立ち上がり及び立ち下がり時の回転体の振れ回りの様子を示す。この場合は、3000rpmまで回転速度を上昇させている。この場合にも、上述と同様に回転体の振れ回りはTD(Touch Down)レベルよりも十分な余裕があり、振れ回りが十分に抑制されていることが判る。この場合は、バランス制御をオフにすると、急峻な立ち上がり時にTD(Touch Down)レベルまで振れ回りが大きくなるが、はじめからバランス制御をオンしておくことにより、急峻な立ち上がり時においても変位センサ(No. 1)に示すように振れ回りが多少大きくなる程度に抑圧することができる。なお、変位センサ(No. 1)はウエハホルダに近い方のラジアル磁気軸受に設けられたセンサであり、変位センサ(No. 2)はウエハホルダから離れた側のラジアル磁気軸受に設けられたセンサである。

【0042】以上に示したように、第二の制御ユニットをそれぞれ必要な制御軸へ付加することで、1) 過大な不釣り合い量を持つ回転体の支持問題、2) 回転体の浮上位置を起因とするモータからの回転運動に同期した外力の支持問題、3) モータの原理に基づく回転数に同期したラジアル外力の支持問題、について磁気軸受の許容支持特性を改善し、回転体の振れ回りを抑制できることが判る。

【0043】例えばモータが2極の誘導モータであった場合、回転数に同期したラジアル外力が発生する。この場合、ファンやポンプ等の回転運動により流体力を発生させる回転機械では、負荷変動に追従した回転運動を維持するために、モータへの入力電力が増加し、より過大なラジアル外力が発生する。転がり軸受や滑り軸受で支持すれば、寿命の低下こそあれ、回転体の支持不能に陥ることは考えられない。しかしながら、接触式軸受を使用できない場合も少なくなく、特殊な環境用の回転機械に磁気軸受を適用した場合には、上記問題に直面することがある。更に高速回転によってウエハ等を乾燥させるスピンドライヤにおいても、被乾燥物が起因となる不釣り合い量の大きさが、通常の磁気軸受支持剛性と比較すると過大な量である場合がある。

【0044】従来の転がり軸受や滑り軸受の支持剛性であれば別であるが、半導体装置用でウエハをバッチ処理(25×n枚)するスピンドライヤでは、必要に応じて磁気軸受の採用を望まれることがあり、同じく前に述べた問題に直面することがある。このように、従来の転がり軸受などを使用していたところに、非接触支持できる磁気軸受を使用したい場合には、既に全体のスペース、軸受のスペース、回転体の構造が決まっているため、必要にして十分な大きさの磁気軸受を組込むことが難しいが、上記本発明によれば係る問題の解決が可能であり、磁気軸受の限界性能を拡大する一つの手法を提供できる。

【0045】

【発明の効果】以上に説明したように、本発明によれば、回転体の浮上位置制御に用いる変位センサ信号のみから、磁気軸受で支持された過大な不釣り合い量を有する回転体の振れ回りを抑制することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】制御形磁気軸受装置の基本的な構成を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態の制御形磁気軸受装置の構成を示す図である。

【図3】図2の制御系のモデルを示すブロック図である。

【図4】図2における第二の制御ユニットの構成を示す図である。

【図5】バッファアンプ、周波数成分抽出器、位相調整器の回路構成例を示す図である。

【図6】信号形成器及びゲイン調整器の回路構成例及び各部の信号波形を示す図である。

【図7】信号形成器の変形例を示す図である。

【図8】信号をオン・オフするスイッチを備えた第二の制御ユニットの構成例を示す図である。

【図9】第三の制御ユニットの回路構成例を示す図である。

【図10】第四の制御ユニットにより信号をオン・オフする制御ユニットの構成例を示す図である。

【図11】第二の制御ユニット内に第二の周波数成分抽出器を備えた場合の構成例を示す図である。

【図12】ゲインを調整する第五の制御ユニットを備えた制御ユニットの構成例を示す図である。

【図13】広い速度範囲に対応可能な制御ユニットを備えた制御形磁気軸受装置の構成例を示す図である。

【図14】第六の制御ユニット内の構成例を示す図である。

【図15】広い速度範囲に対応可能な位相調整器の構成例を示す図である。

【図16】磁気軸受で支持されたウエハスピンドライヤの構成を示す図である。

【図17】ラジアル磁気軸受のサーボ制御系の力/変位の伝達特性例を示す図である。

【図18】オープンバランス制御相当の試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オフの場合を示す。

【図19】オープンバランス制御相当の試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オンの場合を示す。

【図20】オープンバランス制御相当の試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オフの場合を示す。

【図21】オープンバランス制御相当の試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オンの場合を示す。

【図22】本発明の制御ユニットによる試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オフの場合を示す。

【図23】本発明の制御ユニットによる試験結果を示す図であり、(a)変位センサ出力、(b)制御出力信号を示し、制御オンの場合を示す。

【図24】本発明の制御ユニットによる試験結果を示す図であり、X軸及びY軸の制御オン時の変位センサ出力を示す図である。

【図25】本発明の制御ユニットによる試験結果を示す図であり、X軸及びY軸の制御オフから制御オン時の変位センサ出力を示す図である。

【図26】図4乃至図6に示す制御回路のゲイン及び位相の周波数特性例を示す図である。

【図27】本発明の実施の形態の第二の制御ユニットの

15

構成例を示す図である。

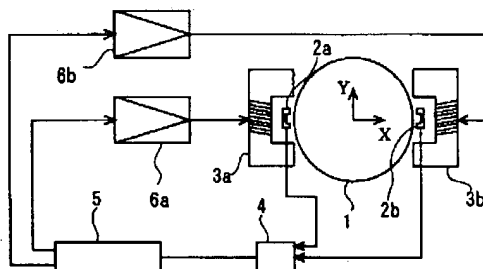
【図28】図27に示す第二の制御ユニットを用いたウエハスピンドライヤにおける、急峻な立上り／立下り、及び高速回転時の回転体の振れ回り特性の実験データを示す図である。

【図29】図27に示す第二の制御ユニットを用いたウエハスピンドライヤにおける、急峻な立上り／立下り、及び高速回転時の回転体の振れ回り特性の他の実験データを示す図である。

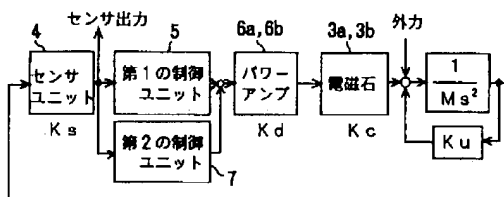
【符号の説明】

1 回転体

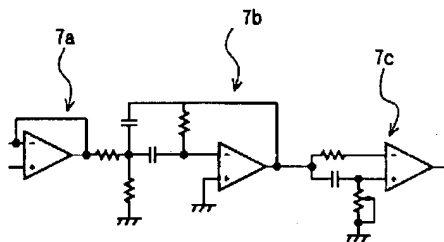
【図1】



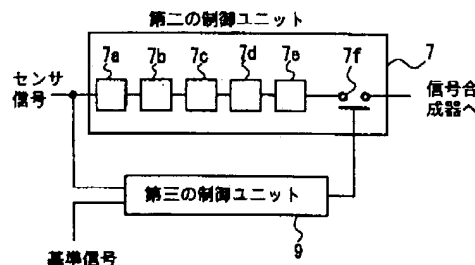
【図3】



【図5】



【図8】



16

2a, 2b 変位センサ

3a, 3b 電磁石

4 センサアンプ

5 第一の制御ユニット

6a, 6b パワーアンプユニット

7 第二の制御ユニット

8 信号合成器

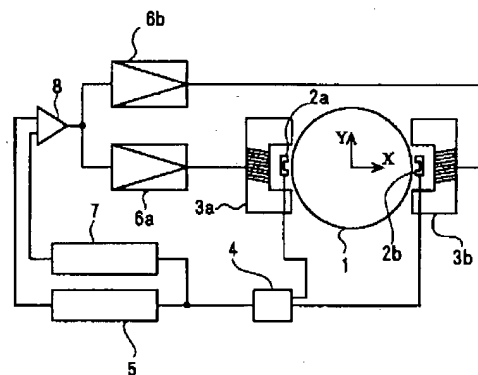
9 第三の制御ユニット

10 第四の制御ユニット

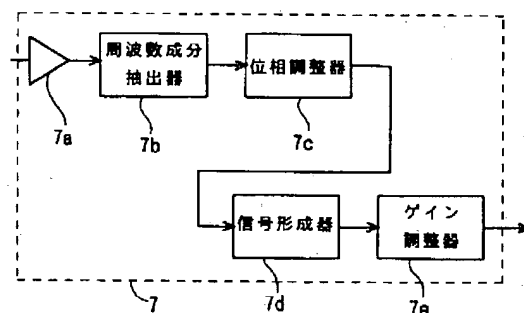
11 第五の制御ユニット

12 第六の制御ユニット

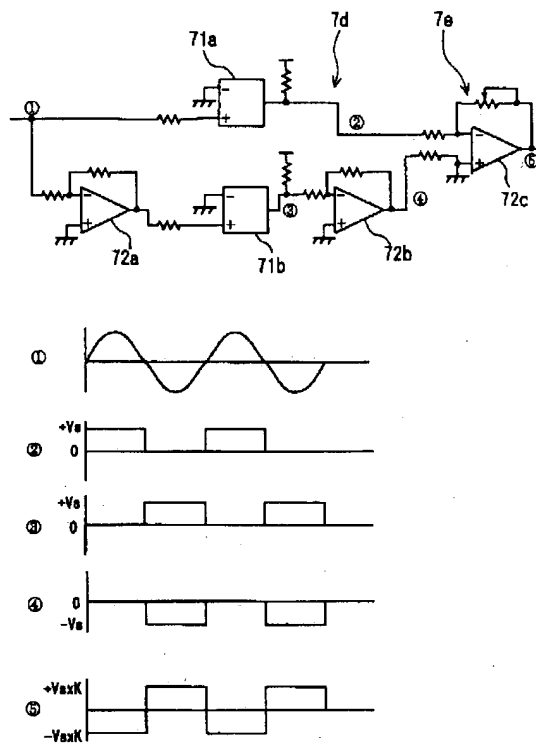
【図2】



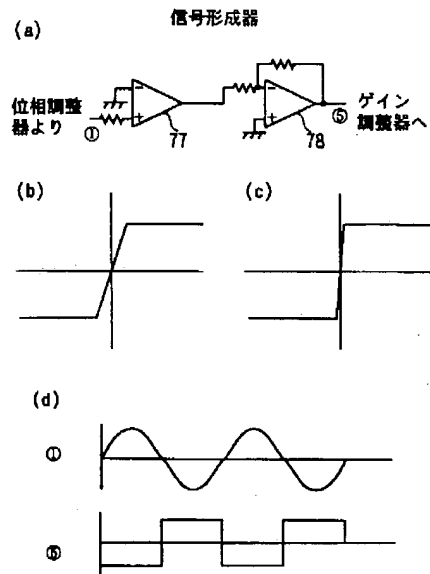
【図4】



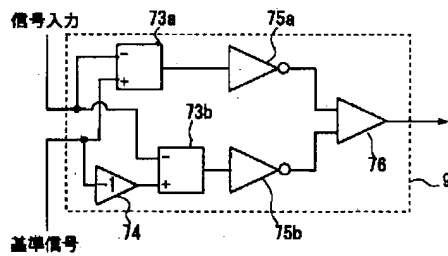
【図6】



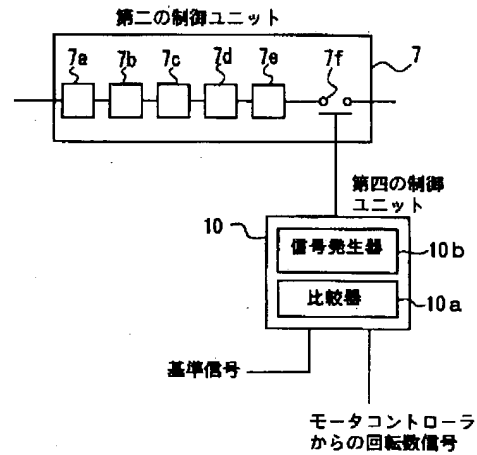
【図7】



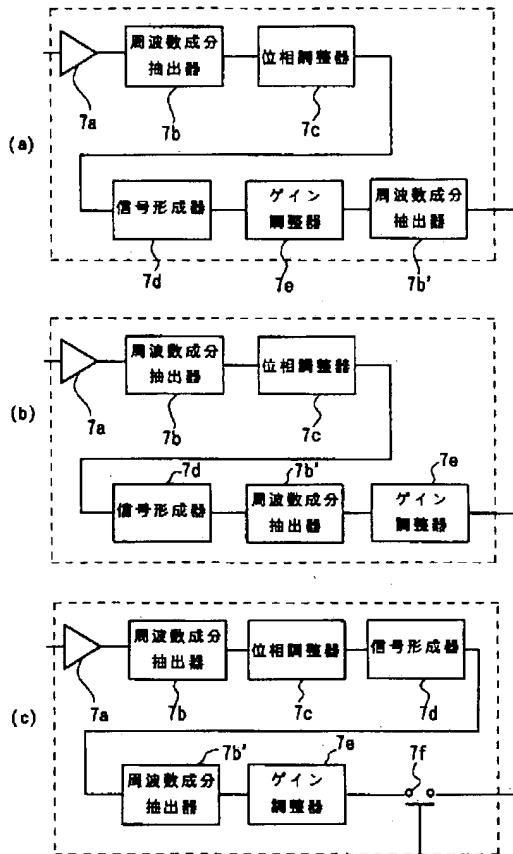
【図9】



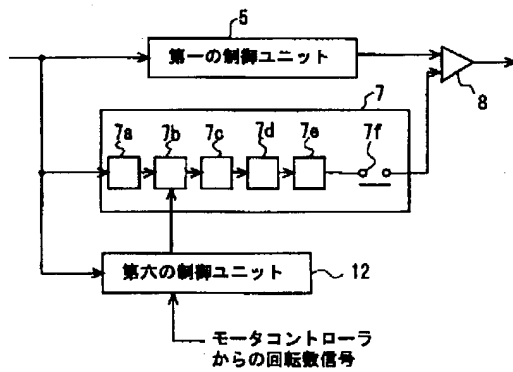
【図10】



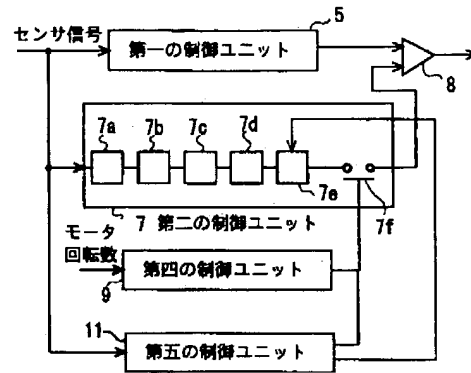
【図11】



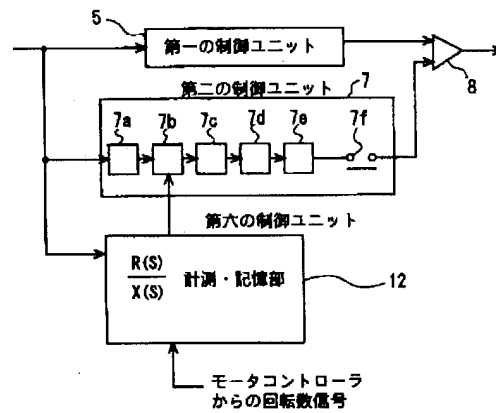
【図13】



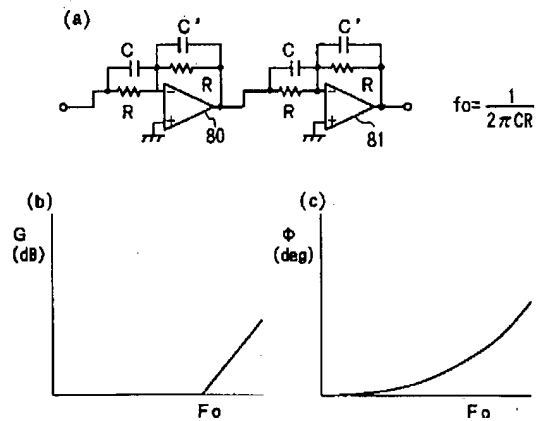
【図12】



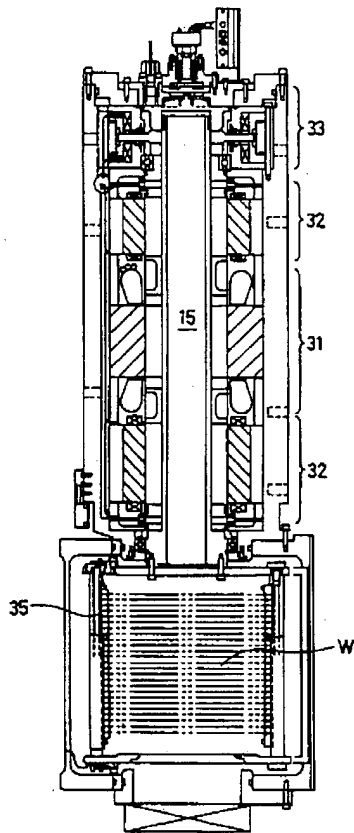
【図14】



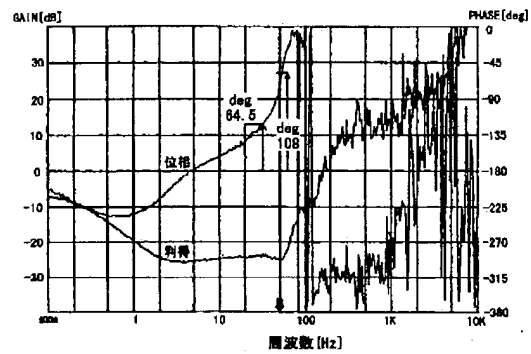
【図15】



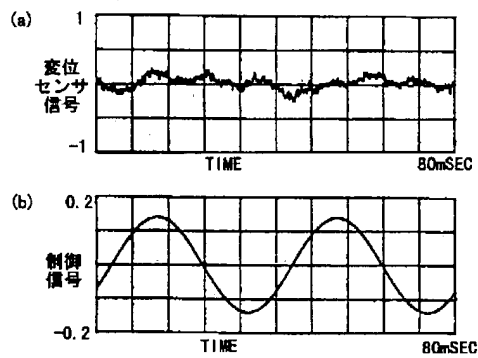
【図16】



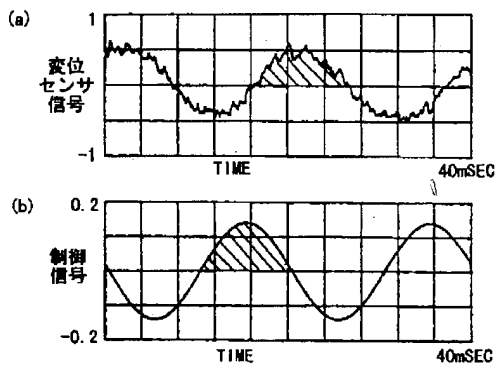
【図17】



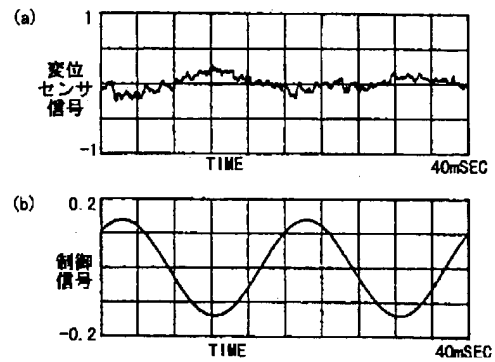
【図21】



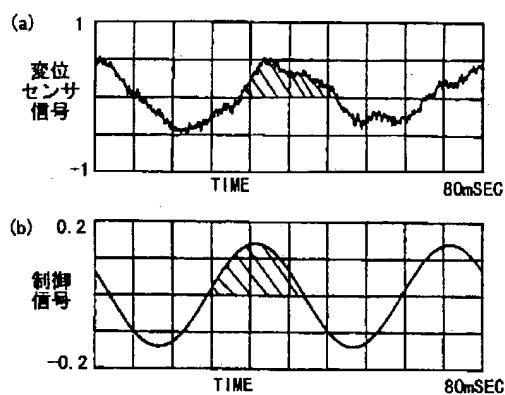
【図18】



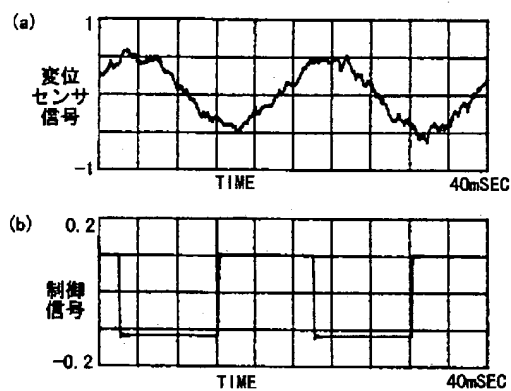
【図19】



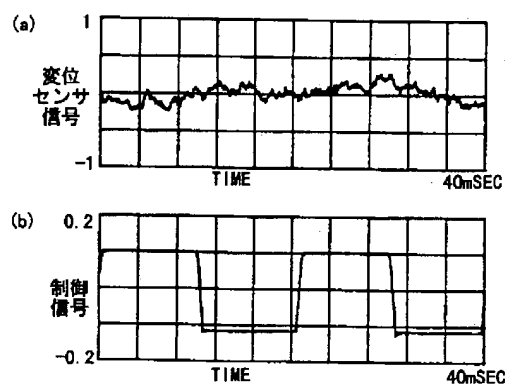
【図20】



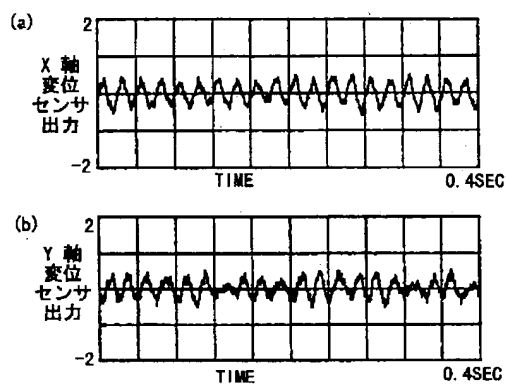
【図22】



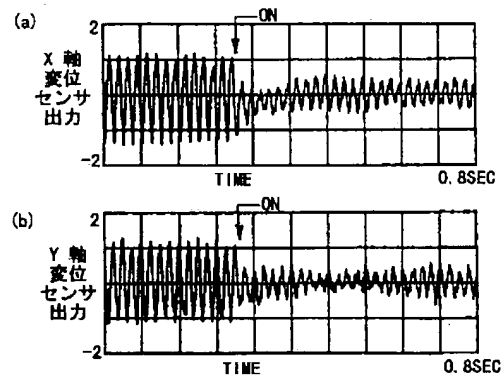
【図23】



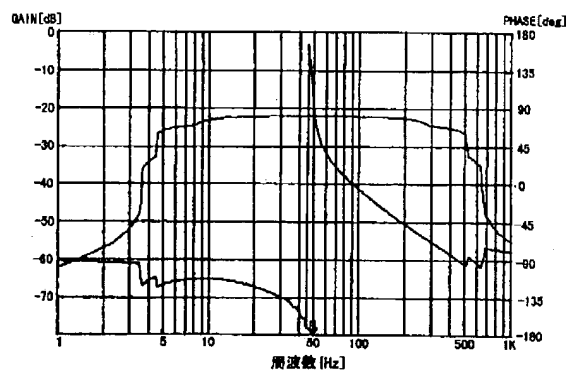
【図24】



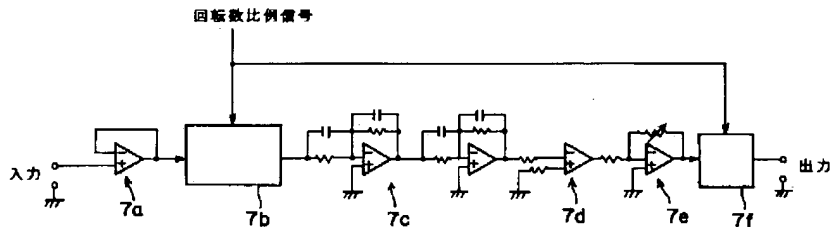
【図25】



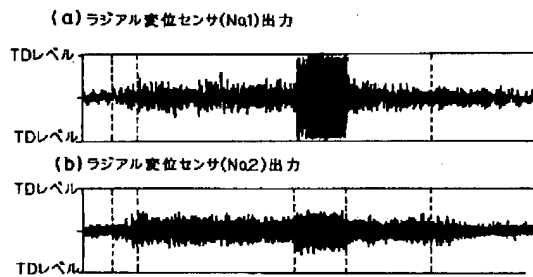
【図26】



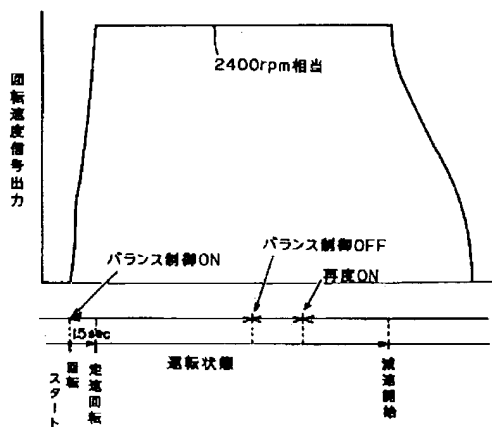
【図27】



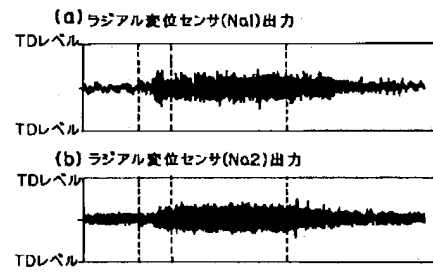
【図28】



(c) 運転状態と回転速度信号出力



【図29】



(c) 運転状態と回転速度信号出力

